



Modelo de la onda cinematica adaptado al riego por surcos cerrados/Kinematic wave model adapted to irrigation with closed-end furrows

J.M. González-Camacho, B. Muñoz-Hernández, R. Acosta-Hernández, J.C. Mailhol

► To cite this version:

J.M. González-Camacho, B. Muñoz-Hernández, R. Acosta-Hernández, J.C. Mailhol. Modelo de la onda cinematica adaptado al riego por surcos cerrados/Kinematic wave model adapted to irrigation with closed-end furrows. *Agrocencia*, 2006, 40 (6), p. 731 - p. 740. hal-00452227

HAL Id: hal-00452227

<https://hal.science/hal-00452227>

Submitted on 1 Feb 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELO DE LA ONDA CINEMÁTICA ADAPTADO AL RIEGO POR SURCOS CERRADOS

KINEMATIC WAVE MODEL ADAPTED TO IRRIGATION WITH CLOSED-END FURROWS

Juan M. González-Camacho¹, Bernardo Muñoz-Hernández², Rafael Acosta-Hernández¹ y Jean C. Mailhol³

¹Cómputo Aplicado. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo Estado de México (jmgc@colpos.mx). ²Secretaría de Desarrollo Agropecuario. Avenida Irrigación s/n. Celaya, Guanajuato. ³Cemagref. UR Irrigation. BP 5095 34196 Montpellier Cedex 5, Francia.

RESUMEN

El riego por gravedad es la técnica más utilizada en las zonas de riego de México. Con frecuencia el riego por surcos cerrados se usa para reducir la pérdida de agua por escurrimiento en suelos arcillosos. En este estudio se propone un enfoque de modelación que permite analizar diferentes alternativas de manejo para mejorar la eficiencia de riego. En particular se adoptó el modelo de la onda cinemática (OC), integrado al modelo de infiltración de Green y Ampt, para simular el riego por surcos cerrados, por simplificación de las condiciones de frontera al final del surco. Los parámetros de infiltración se estiman a partir de datos de avance obtenidos en campo, mediante la solución numérica del problema inverso avance-infiltración. El modelo OC propuesto simula las fases de avance, almacenamiento, recesión y avance-recesión simultánea para un riego por surcos; se aplica hasta el instante en que el escurrimiento al final del surco es cero. Para simular la condición de surco cerrado, se propone un método simplificado que redistribuye, a cada intervalo de tiempo, el volumen escurrido teórico sobre la superficie aguas abajo del surco y luego desaparece progresivamente por efecto de la infiltración. El modelo se validó con datos obtenidos en la parcela experimental del Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. El error relativo de la eficiencia de aplicación y el coeficiente de uniformidad de Christiansen entre los datos simulados y los experimentales fue 8%. El error de balance de masa entre el volumen de agua aplicado en campo y el calculado fue menor de 3.6%.

Palabras clave: Infiltración Green y Ampt, problema inverso, riego por gravedad.

INTRODUCCIÓN

Hay diferentes enfoques de modelación matemática para evaluar y mejorar el funcionamiento hidráulico de los sistemas de riego por gravedad. Éstos permiten analizar diferentes condiciones de operación como la selección del gasto y el tiempo de riego que garanticen mayor uniformidad y eficiencia de

ABSTRACT

Surface irrigation is the most used technique in irrigation zones of México. It is often utilized in closed-end furrow irrigation in order to reduce water loss by runoff in clay soils. In this study, a modeling approach is proposed, which permits to analyze different management alternatives to improve application efficiency. Particularly, the kinematic wave model (KWM), integrated to the Green and Ampt infiltration model, was adopted to simulate irrigation with closed-end furrows by simplifying boundary conditions at the furrow end. Infiltration parameters are estimated from advance data obtained in the field, by solving numerically the inverse infiltration-advance problem. The proposed KWM simulates the phases of advance, storage, recession, and simultaneous recession-advance for furrow irrigation; it is applied until the moment when runoff at the furrow end is zero. In order to simulate the condition of closed-end furrow a simplified method is proposed, which redistributes, at each time step, the theoretical runoff volume, on the downstream water furrow surface and then this volume disappears by infiltration effect. The model was validated with data obtained in the experimental plot of the Colegio de Postgraduados at Montecillo, México. The relative error of application efficiency and Christiansen's uniformity coefficient between simulated and experimental data was 8%. The mass balance error between the water volume applied in the field and the calculated one was lower than 3.6%.

Key words: Green and Ampt infiltration, inverse problem, surface irrigation.

INTRODUCTION

There are different approaches of mathematical modeling to evaluate and improve the hydraulic functioning of surface irrigation systems. They allow analyzing different operation conditions such as choice of inflow rate and irrigation time, which may guarantee greater uniformity and water application efficiency. In order to model surface irrigation, hydrodynamic models with different complexity and precision levels have been proposed

aplicación del agua. Para modelar el riego por gravedad se han propuesto modelos hidrodinámicos con diferentes niveles de complejidad y precisión para representar el flujo superficial y subterráneo (Souza, 1984; Scaloppi, 1986; Walker y Skogerboe, 1987).

Un modelo intermedio, que simplifica la ecuación dinámica para el flujo superficial, es el modelo cinemático. Este enfoque permite simular las fases de avance, almacenamiento, recesión y avance-recesión, del riego por surcos. Por hipótesis, se supone que el flujo escurre libremente al final del surco con un tirante normal durante las fases de almacenamiento y recesión (Walker y Humpherys, 1983; Wallender y Yokokura, 1991). El modelo de la onda cinemática (OC) es suficientemente preciso para flujo subcrítico ($F < 1$), en terrenos con pendientes mayores a 0.1% o para un valor $K \cdot F > 7.5$, donde K es el número de la onda cinemática y F es el número de Froude, siempre que la frontera aguas abajo del surco no tenga encharcamientos (Gharbi *et al.*, 1993; Reddy y Singh, 1994).

Una estrategia para evitar las pérdidas por escurrimiento en el riego por gravedad es cerrar el extremo aguas abajo de surco y cortar el suministro de agua cuando el avance del agua llega al final del surco o poco después. Esta práctica se usa en zonas de riego semiáridas para evitar las pérdidas por escurrimiento, aumentar el volumen infiltrado y mejorar la eficiencia en la aplicación del agua (Mailhol *et al.*, 1997; Abu-Awwad, 1998).

En este trabajo se propone una adaptación al modelo cinemático integrado al modelo de infiltración de Green y Ampt (1911) para simular la condición de surco cerrado. El enfoque consiste en distribuir proporcionalmente sobre la superficie del surco, a cada intervalo de tiempo, el volumen escurrido durante las fases de almacenamiento y recesión.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo OC se representa por la ecuación de continuidad y la ecuación dinámica simplificada para régimen uniforme. La ecuación de continuidad con la inclusión de volúmenes infiltrados y la ecuación para régimen uniforme son (Walker y Humpherys, 1983):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

$$S_0 = S_f \quad (2)$$

donde Q es el gasto aplicado por unidad de anchura ($L^3 T^{-1} L^{-1}$); A el área de la sección transversal del surco (L^2); I el volumen infiltrado por unidad de longitud ($L^3 L^{-1}$); t el tiempo acumulado

to represent surface and underground flow (Souza, 1984; Scaloppi, 1986; Walker and Skogerboe, 1987).

An intermediate model simplifying the dynamic equation for surface flow is the kinematic model. This approach allows simulating the phases of advance, storage, recession, and recession-advance of furrow irrigation. By hypothesis, it is assumed that the flow runs off freely at the end of the furrow with normal depth during storage and recession phases (Walker and Humpherys, 1983; Wallender and Yokokura, 1991). The kinematic wave model (KW) is precise enough for the subcritical flow ($F < 1$), in lands with slopes greater than 0.1%, or for a value $K \cdot F > 7.5$, where K is the number of the kinematic wave, and F is the number of Froude, provided that the downstream furrow boundary does not present flooding (Gharbi *et al.*, 1993; Reddy and Singh, 1994).

One strategy to avoid water losses by run off in surface irrigation, is to close the furrow end and cut off the water supply, when the water advance comes to the furrow end or shortly afterwards. This practice is used in semi-arid irrigation zones in order to avoid runoff losses, to increase the infiltrated volume, and to improve water application efficiency (Mailhol *et al.*, 1997; Abu-Awwad, 1998).

In this study, an adaptation to the kinematic model integrated to the Green and Ampt (1911) infiltration model is proposed for simulating the closed-end furrow condition. The approach consists in redistributing proportionally the runoff volume, on the furrow surface at each time interval during storage and recession phases.

MATERIALS AND METHODS

The model KW is represented by the continuity and the dynamics equation, simplified for uniform regime. The continuity equation with the inclusion of infiltrated volumes and the equation for uniform regime are (Walker and Humpherys, 1983):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

$$S_0 = S_f \quad (2)$$

where, Q is the inflow rate applied per width unit ($L^3 T^{-1} L^{-1}$); A the cross-section area of the furrow (L^2); I the infiltrated volume per length unit ($L^3 T^{-1}$); t the accumulated time (T); $\tau = t - tx$ the opportunity time to infiltrate a given volume (T); x the advance distance (L); tx is the time that the front needs to reach distance x (T); S_0 the slope of the furrow bottom (adim); S_f the slope of the energy line (adim).

(T); $\tau=t-tx$ el tiempo de oportunidad para infiltrar un volumen dado (T); x la distancia de avance (L); tx es el tiempo que tarda el frente en alcanzar la distancia x (T); S_0 la pendiente del fondo del surco (adim); S_f la pendiente de la línea de energía (adim).

La ecuación (2) puede remplazarse por una relación gasto-área dada por la ecuación de Manning-Strickler:

$$\left(\frac{Qn}{AR_h^{2/3}} \right)^2 = S_0 \quad (3a)$$

donde n es el coeficiente de rugosidad, R_h el radio hidráulico ($R_h=A/P$) en (L); P el perímetro mojado en (L). La relación gasto-área (3a) se simplifica por:

$$Q = \alpha A^m \quad (3b)$$

$$\text{donde } \alpha = \frac{(\rho_1 S_0)^{1/2}}{n}; \quad m = \frac{\rho_2}{2}$$

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por regresión lineal a partir de datos de la geometría del surco; esto es, $A^2 R_h^{4/3} = \rho_1 A^{\rho_2}$.

El número cinemático K está dado por $K = \frac{S_0 L}{F^2 h_0}$, donde L es la longitud del surco (L), h_0 el tirante normal (L) y el número de Froude F es expresado por $F = \frac{V_0}{\sqrt{g h_0}}$, donde V_0 es la velocidad del flujo ($L T^{-1}$), y g la constante gravitacional ($L T^{-2}$) (Gharbi *et al.*, 1993; Reddy y Singh, 1994).

La ecuación (2) remplazada por la ecuación (3b) permite expresar la ecuación de continuidad (1) únicamente en términos de A :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha A^m)}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial \tau} = 0 \quad (4)$$

La ecuación (4) se resuelve con el método explícito de integración de Euler, basado en incrementos individuales de tiempo (dt) y espacio (dx); el esquema numérico que se presenta enseguida es (Walker y Humpherys, 1983):

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[\theta Q_{j+1} + (1-\theta)Q_j \right] - \left[\theta Q_{i+1} + (1-\theta)Q_i \right] \right\} dt + \\ & \left\{ \left[\varphi A_{i+1} + (1-\varphi)A_{j+1} \right] - \left[\varphi A_i + (1-\varphi)A_j \right] \right\} dx + \\ & \left\{ \left[\varphi I_{i+1} + (1-\varphi)I_{j+1} \right] - \left[\varphi I_i + (1-\varphi)I_j \right] \right\} dx = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

donde $0 \leq \theta \leq 1$ y $0 \leq \varphi \leq 1$; valores de $\theta=0.65$ y $\varphi=0.65$ garantizan una buena estabilidad numérica; i es el índice para tiempo y j es el índice para espacio.

El esquema numérico de integración (5) se resuelve explícitamente para cada intervalo dt y distancia dx . La única variable desconocida es la sección de mojado A_{j+1} , ya que el gasto Q_{j+1} se

Equation (2) may be replaced by an inflow rate-area relation given by the Manning-Strickler equation:

$$\left(\frac{Qn}{AR_h^{2/3}} \right)^2 = S_0 \quad (3a)$$

where n is the roughness coefficient, R_h the hydraulic radius ($R_h=A/P$) in (L); P the wetted perimeter in (L). The inflow rate-area relation (3a) is simplified by:

$$Q = \alpha A^m \quad (3b)$$

$$\text{where } \alpha = \frac{(\rho_1 S_0)^{1/2}}{n}; \quad m = \frac{\rho_2}{2}$$

The ρ_1 and ρ_2 parameters are obtained by linear regression from furrow geometry data, that is: $A^2 R_h^{4/3} = \rho_1 A^{\rho_2}$.

The kinematic number K is given by $K = \frac{S_0 L}{F^2 h_0}$, where L is the furrow length (L), h_0 the normal depth (L), and the number F of Froude is defined by $F = \frac{V_0}{\sqrt{g h_0}}$, where V_0 is the flow rate ($L T^{-1}$), and g the gravitational constant ($L T^{-2}$) (Gharbi *et al.*, 1993; Reddy and Singh, 1994).

Equation (2) replaced by equation (3b) allows expressing the continuity equation (1) only in terms of A :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha A^m)}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial \tau} = 0 \quad (4)$$

Equation (4) is solved with Euler's explicit integration method, based on individual time (dt) and space (dx) increments; the numerical scheme, presented next is (Walker and Humpherys, 1983):

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[\theta Q_{j+1} + (1-\theta)Q_j \right] - \left[\theta Q_{i+1} + (1-\theta)Q_i \right] \right\} dt + \\ & \left\{ \left[\varphi A_{i+1} + (1-\varphi)A_{j+1} \right] - \left[\varphi A_i + (1-\varphi)A_j \right] \right\} dx + \\ & \left\{ \left[\varphi I_{i+1} + (1-\varphi)I_{j+1} \right] - \left[\varphi I_i + (1-\varphi)I_j \right] \right\} dx = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

where $0 \leq \theta \leq 1$ and $0 \leq \varphi \leq 1$; values of $\theta=0.65$ and $\varphi=0.65$ guarantee good numerical stability; i is the time index and j the space index.

The numerical integration scheme (5) is explicitly solved for each dt interval and dx distance. The only unknown variable is the wetted cross-section A_{j+1} , since inflow rate Q_{j+1} is derived from relation (3b). The value of A_{j+1} is obtained from equation (5):

$$A_{j+1}^m + C_1 A_{j+1} + C_2 = 0 \quad (6)$$

where:

deriva de la relación (3b). El valor de A_{j+1} se obtiene de la ecuación (5):

$$A_{j+1}^m + C_1 A_{j+1} + C_2 = 0 \quad (6)$$

donde:

$$C_1 = \frac{(1-\phi)}{\theta\alpha} \frac{dx}{dt};$$

$$C_2 = -A_{i+1}^m - \frac{(1-\theta)}{\theta} (A_j^m - A_i^m) + \frac{\phi}{\theta\alpha} \frac{dx}{dt} (A_{i+1} + I_{i+1} - A_i - I_i) + \frac{(1-\phi)}{\theta\alpha} (I_{j+1} - A_j - I_j) \frac{dx}{dt}$$

Condiciones iniciales y de frontera

Para la primera distancia dx_1 , los valores correspondientes a A_{j+1} , A_i , A_j , I_{j+1} , I_i y I_j son nulos, A_{i+1} e I_{i+1} se obtienen de la ecuación (6), por lo cual, dx_1 está dado por:

$$dx_1 = \frac{\theta\alpha A_{i+1}^m dt}{\phi (A_{i+1} + I_{i+1})} \quad (7)$$

El cálculo de las secciones A_{j+1} de aguas arriba (inicio del surco) hacia aguas abajo (final del surco), para cada intervalo de tiempo dt , se hace con la ecuación (6). La distancia después del inicio cambia a dx en el frente de avance y se calcula con la ecuación (7).

En la cabecera del surco, se consideran las siguientes condiciones de frontera:

$A=0$; si $t=0$

$A=A_0$; $Q_0=\alpha A_0^m$; si $0 < t \leq tc$

$A_0=Q_0=0$; si $t > tc$; donde t es el tiempo de riego y tc es el tiempo de corte del riego.

Las condiciones de frontera aguas abajo del escurrimiento son: el frente de avance se calcula con la ecuación (7); el volumen de escurrimiento se calcula con la ecuación (6) para conocer la sección de mojado y el gasto para cada dt . La fase de recesión se inicia después del tiempo de corte tc ; para ello, el tirante h_0 en la cabecera del surco se anula.

Este método de integración tiene dos ventajas: la fase de recesión se incorpora por medio del área de mojado a lo largo del surco y su estabilidad numérica es mejor para las condiciones iniciales, especialmente cuando el avance es muy pequeño o las características del suelo varían a lo largo del surco (Walker y Humpherys, 1983; Wallender y Yokokura, 1991).

Se desarrolló un programa de cómputo en lenguaje C++ para aplicar el enfoque de la onda cinemática al riego por surcos, integrado al modelo de infiltración de Green y Ampt (1911) para representar la evolución del volumen infiltrado. Los parámetros del modelo de Green y Ampt tienen significación física y facilitan su actualización temporal, en función de las características de humedad del suelo, el cual tiene la forma:

$$C_1 = \frac{(1-\phi)}{\theta\alpha} \frac{dx}{dt};$$

$$C_2 = -A_{i+1}^m - \frac{(1-\theta)}{\theta} (A_j^m - A_i^m) + \frac{\phi}{\theta\alpha} \frac{dx}{dt} (A_{i+1} + I_{i+1} - A_i - I_i) + \frac{(1-\phi)}{\theta\alpha} (I_{j+1} - A_j - I_j) \frac{dx}{dt}$$

Initial and boundary conditions

For the first distance dx_1 , the values corresponding to A_{j+1} , A_i , A_j , I_{j+1} , I_i and I_j are zero; A_{i+1} and I_{i+1} are obtained from equation (6), by which dx_1 is given by

$$dx_1 = \frac{\theta\alpha A_{i+1}^m dt}{\phi (A_{i+1} + I_{i+1})} \quad (7)$$

The calculation of the sections A_{j+1} of upstream water (furrow inlet) towards downstream water (furrow end) for each time step dt , is made with equation (6). The distance after the beginning changes to dx at the advance front and is calculated with equation (7).

At the furrow inlet the following boundary conditions are considered:

$A=0$, if $t=0$

$A=A_0$; $Q_0=\alpha A_0^m$; if $0 < t \leq tc$

$A_0=Q_0=0$; if $t > tc$; where t is the irrigation time and tc the time of irrigation cut off.

The downstream runoff boundary conditions are the following: the advance front is calculated with equation (7); the runoff volume is calculated with equation (6) in order to calculate the wetted cross-section area and the depth for each dt . The recession phase begins after the time of cut off tc ; for this, the depth h_0 at the furrow inlet becomes zero.

This integration method has two advantages: the recession phase is integrated along the furrow by means of the wetted cross-section area, and its numerical stability is better for the initial conditions; especially when the advance is very small, or the soil characteristics vary along the furrow (Walker and Humpherys, 1983; Wallender and Yokokura, 1991).

A computer program in C++ language was developed to apply the kinematic wave approach to furrow irrigation, integrated to the Green and Ampt infiltration model (1911) in order to represent the evolution of infiltrated volume. The parameters of the Green and Ampt model have physical significance and facilitate their temporal updating, according to soil moisture characteristics, having the form:

$$I = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{I}{\lambda} \right) \quad (8)$$

where, $\lambda = (d + h_f)(\theta_s - \theta_0)$ (L), K_s is the hydraulic conductivity to saturation (L T⁻¹); d the mean depth (L); h_f the capillarity

$$I = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{I}{\lambda} \right) \quad (8)$$

donde, $\lambda = (d + h_f)(\theta_s - \theta_0)$ (L); K_s es la conductividad hidráulica a saturación ($L\ T^{-1}$); d el tirante medio (L); h_f el potencial capilar en el frente húmedo (L); θ_0 el contenido de humedad inicial ($L^3\ L^{-3}$) y θ_s es el contenido de humedad a saturación ($L^3\ L^{-3}$). Este modelo es adecuado para condiciones de manto freático profundo.

El volumen infiltrado I se obtiene resolviendo la ecuación no lineal (8) en forma iterativa. Se considera un valor inicial de I para tiempos cortos ($t \rightarrow 0$) y otro para tiempos largos ($t \rightarrow \infty$), (Parlange *et al.*, 1982; Fuentes, 1990); esto es:

$$I = S t^{1/2} + S_2 t; \quad \text{si } t \leq t_{grav} \quad (9a)$$

$$I = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{K_s t}{\lambda} \right); \quad \text{si } t > t_{grav} \quad (9b)$$

donde, $S = (2K_s \lambda)^{1/2}$; $S_2 = 2/3K_s$; $t_{grav} = [S/K_s]^2$; en este caso t_{grav} es una aproximación al tiempo gravitacional definido por Philip (1969) como, $t_{grav} = [S/(K_1 - K_0)]^2$; $K_1 = K_s$.

Los parámetros de infiltración se identificaron a partir de datos de avance del riego (Philip y Farrell, 1964; Mailhol y González, 1993; Khatri y Smith, 2005). Para ello se aplicó la técnica de optimización propuesta por González *et al.* (1996) para identificar los parámetros (K_s y λ). El problema consiste en determinar los parámetros (K_s y λ) de manera que el error entre el vector de tiempos de avance observados y estimados sea mínimo. El vector de tiempos de avance estimados se obtiene con el modelo OC. El modelo de Green y Ampt es adecuado en suelos que no presentan agrietamiento o una trayectoria de avance lineal; un avance quasi lineal origina divergencia en el proceso de optimización. En estos casos es más apropiado utilizar el modelo de infiltración lineal $I = B + K_s t$ descrito por Mailhol y González (1993).

Análisis de la condición de surco cerrado

Para tomar en cuenta la condición de surco cerrado en el modelo OC primero se simulan las fases del riego para la condición de surco abierto. Ésto permite conocer el volumen de escurrimiento durante las fases de almacenamiento y recesión, para cada tiempo t_i , el cual es redistribuido sobre la superficie del surco. El volumen total escurrido es infiltrado sobre la superficie del surco para no alterar el balance de masa del modelo OC y obtener la lámina infiltrada total. Las pérdidas por evaporación y difusión lateral se consideran no significativas.

Al término de la recesión t_r , el volumen total aplicado V_t es igual al volumen infiltrado V_{inf} más el volumen escurrido V_i , y el volumen almacenado V_s es igual a cero. Bajo la condición de surco cerrado, en el mismo tiempo t_r , V_t y V_{inf} son iguales productos de los mismos tiempos de corte y de oportunidad. Sin embargo, si el

potential at the moisture front (L); θ_0 the initial moisture content ($L^3\ L^{-3}$); θ_s the moisture content at saturation ($L^3\ L^{-3}$). This model is adequate for conditions of deep water table.

The infiltrated volume I is obtained by solving iteratively the nonlinear equation (8). An initial value of I is considered for short-term ($t \rightarrow 0$) and another for long-term ($t \rightarrow \infty$), (Parlange *et al.*, 1982; Fuentes, 1990); that is:

$$I = S t^{1/2} + S_2 t; \quad \text{si } t \leq t_{grav} \quad (9a)$$

$$I = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{K_s t}{\lambda} \right); \quad \text{si } t > t_{grav} \quad (9b)$$

where, $S = (2K_s \lambda)^{1/2}$; $S_2 = 2/3K_s$; $t_{grav} = [S/K_s]^2$; in this case t_{grav} is an approximation to gravitational time defined by Philip (1969) as, $t_{grav} = [S/(K_1 - K_0)]^2$; $K_1 = K_s$.

The infiltration parameters were identified from irrigation advance data (Philip and Farrell, 1964; Mailhol and González, 1993; Khatri and Smith, 2005). To this purpose, the optimization technique proposed by González *et al.* (1996) was applied in order to identify the parameters (K_s and λ). The problem consists in determining the parameters (K_s and λ) so that the error between the vector of observed and estimated advance times be minimum. The estimated advance time vector is obtained with the KWM. The Green and Ampt model is adequate in soils without cracking or linear advance trajectory; a quasi linear advance originates convergence problems, in the optimization process. In these cases it is most appropriate to use the linear infiltration model $I = B + K_s t$, described by Mailhol and González (1993).

Analysis of closed-end furrow condition

To take into account the closed-end furrow condition in the KW model, first the irrigation phases for opened-end furrow condition are simulated. This allows calculating the runoff volume during storage and recession phases for each time t_i , which is redistributed on the furrow surface. The total runoff volume is infiltrated on the furrow surface in order to not alter the mass balance of KW model and to obtain the total infiltrated depth. The losses by evaporation and lateral diffusion are considered not significant.

At the end of recession t_r , the total applied volume V_t is equal to the infiltrated volume V_{inf} plus runoff volume V_i ; and the stored volume V_s is equal to zero. Under closed-end furrow condition, in the same time t_r , V_t and V_{inf} are equal products, of the same cut off and opportunity times. However, if V_i does not run off, it is stored at the downstream furrow end, this is $V_s = V_i$. Then, a length occupied by water L_i and a cross-section A_i with h_i depth at the furrow end (Figure 1) are obtained.

The length of the wetted area L_i for each time i , is deduced from the following relations:

Let L_i be the length occupied by water; A_i the wetted cross-section area and h_i the depth at the downstream furrow ends.

V_i no escurre, se almacena en el extremo aguas abajo del surco, esto es $V_s = V_i$. Luego hay una longitud ocupada por agua L_i^* y en el extremo final del surco una sección transversal A_i con un tirante h_i (Figura 1).

La longitud de mojado L_i^* para cada tiempo i , se deduce de las siguientes relaciones:

Sea L_i^* la longitud ocupada por agua, A_i la sección de mojado y h_i el tirante en el extremo aguas abajo del surco. El valor del tirante $h_i = S_0 L_i^*$ se reemplaza por la relación tirante-área, $h = \sigma_1 A^{\sigma_2}$, donde σ_1 y σ_2 son parámetros de ajuste estimados a partir de la geometría del surco. El área de la sección mojada al final del surco (A_i) se expresa por:

$$A_i = \omega_1 S_0^{\omega_2} (L_i^*)^{\omega_2} \quad (10)$$

donde, $\omega_1 = (\sigma_1)^{-1/\sigma_2}$ y $\omega_2 = \sigma_2^{-1}$

El volumen de escurrimiento V_i definido en términos de L_i^* se obtiene al integrar el volumen teóricamente almacenado de 0 a L_i^* (Figura 1). El volumen diferencial para una longitud dL se expresa por:

$$dV_i = A_i(L) dL \quad (11)$$

Al sustituir la ecuación (10) en (11) e integrando, se tiene:

$$V_i = \omega_1 S_0^{\omega_2} \int_0^{L_i^*} L^{\omega_2} dL \quad (12)$$

De donde L_i^* queda definido por:

$$L_i^* = \left(\frac{V_i}{f \omega_1 (S_0)^{\omega_2}} \right)^f \quad (13)$$

donde, $f = 1/(\omega_2 + 1)$

Las ecuaciones (10) y (13) permiten calcular la sección transversal y la longitud de mojado al final del surco cerrado, para cada V_i . Las áreas de mojado intermedias se interpolan con la expresión:

$$Ax' = \frac{x'}{L_i^*} A_i \quad \text{donde} \quad 0 \leq x' \leq L_i^* \quad (14)$$

Para cada V_i , las áreas de mojado interpoladas se suman al perfil superficial calculado con el modelo OC, el cual proporciona para cada tiempo $t_i > t_a$, el volumen V_i que escurre en surco abierto. Para simular la condición de surco cerrado, el volumen de escurrimiento se distribuye como V_s sobre la superficie del surco y las áreas de mojado intermedias se determinan con la ecuación (14).

Depth value $h_i = S_0 L_i^*$ is replaced by the area-depth relation, $h = \sigma_1 A^{\sigma_2}$, where σ_1 and σ_2 are fitting parameters estimated from the furrow geometry. The wetted cross-section area at the furrow end (A_i) is expressed by:

$$A_i = \omega_1 S_0^{\omega_2} (L_i^*)^{\omega_2} \quad (10)$$

where, $\omega_1 = (\sigma_1)^{-1/\sigma_2}$ and $\omega_2 = \sigma_2^{-1}$

The runoff volume V_i defined in terms of L_i^* is obtained at integrating the volume theoretically stored from 0 to L_i^* (Figure 1). The differential volume for a dL length is expressed by:

$$dV_i = A_i(L) dL \quad (11)$$

At substituting equation (10) in (11) and integrating it, the following expression is obtained:

$$V_i = \omega_1 S_0^{\omega_2} \int_0^{L_i^*} L^{\omega_2} dL \quad (12)$$

Finally L_i^* is defined by:

$$L_i^* = \left(\frac{V_i}{f \omega_1 (S_0)^{\omega_2}} \right)^f \quad (13)$$

where $f = 1/(\omega_2 + 1)$

Equations (10) and (13) allow calculating the cross-section area and the length of wetted area at the closed-end furrow, for each V_i . The intermediate wetted areas are interpolated with expression:

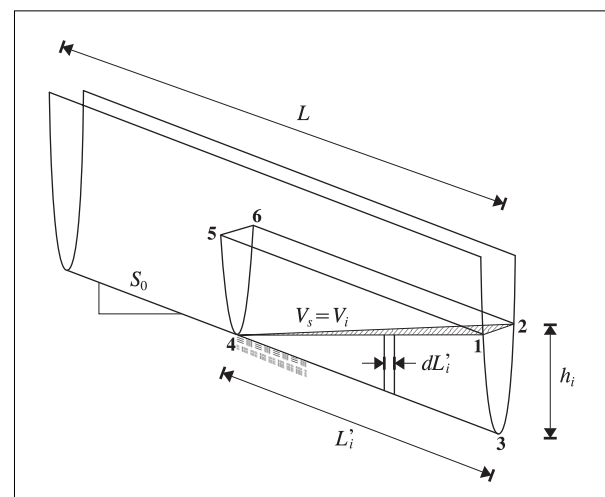


Figura 1. Distribución del volumen superficial en la fase de recesión bajo la condición de surco cerrado.
Figure 1. Distribution of surface volume in recession phase under closed-end furrow condition.

Criterios para la evaluación de los riegos

Los criterios más comunes para evaluar la calidad de un riego por gravedad son la eficiencia de aplicación (E_a), la eficiencia de requerimiento de riego (E_r) y el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU_C), los cuales se definen como sigue (ICID, 1978):

La eficiencia de aplicación E_a se expresa como:

$$E_a = \left(\frac{L_{ir}}{L_t} \right) 100 \quad (15)$$

donde, L_{ir} es la lámina infiltrada en la zona radicular (L) y L_t la lámina total aplicada a la parcela (L).

La eficiencia de requerimiento de riego (E_r) está dada por:

$$E_r = \left(\frac{L_{ir}}{L_r} \right) 100 \quad (16)$$

donde, L_r es la lámina requerida por el cultivo (L).

El coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU_C) se calcula por:

$$CU_C = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |L_i - L_m|}{NL_m} \right) 100 \quad (17)$$

donde, L_i es la lámina infiltrada a una distancia dada del surco; L_m la lámina promedio infiltrada; N es el número de valores considerados.

Criterios para evaluar la bondad de ajuste del modelo cinemático

Los criterios usados para evaluar el grado de ajuste del modelo OC son: cuadrado medio del error (CME) y el porcentaje de error (PE) entre los parámetros observados y calculados:

$$CME = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D - \hat{D})^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

donde, D es el parámetro calculado con datos de campo y \hat{D} es el parámetro estimado con datos simulados, y por:

$$PE = \frac{D - \hat{D}}{D} 100 \quad (19)$$

donde PE es el porcentaje de error del balance de masa; D el volumen total aplicado y \hat{D} la suma del volumen infiltrado más el volumen de escurrimiento estimados.

Recolección de datos experimentales

Para validar la metodología propuesta se realizaron pruebas de riego en el lote E6 del campo experimental del Colegio de

$$Ax' = \frac{x'}{L_i} A_i \quad \text{where } 0 \leq x' \leq L_i' \quad (14)$$

For each V_i , the interpolated wetted areas are added to the surface profile calculated with the KW model, which provides for each time $t_i > t_a$, the volume V_i running off in open furrow. In order to simulate closed-end furrow condition, the runoff volume is distributed as V_s on the furrow surface, and the intermediate wetted areas are determined with equation (14).

Criteria for evaluating irrigation performance

The most common criteria for evaluating the performance of surface irrigation are application efficiency (E_a), irrigation requirement efficiency (E_r), and Christiansen's uniformity coefficient (CU_C), which are defined as below (ICID, 1978):

Application efficiency E_a is expressed as:

$$E_a = \left(\frac{L_{ir}}{L_t} \right) 100 \quad (15)$$

where, L_{ir} is the infiltrated depth in the root zone (L), and L_t the total depth applied to the plot (L).

The irrigation requirement efficiency (E_r) is given by:

$$E_r = \left(\frac{L_{ir}}{L_r} \right) 100 \quad (16)$$

where, L_r is the depth required by the crop (L).

Christiansen's uniformity coefficient (CU_C) is calculated by:

$$CU_C = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |L_i - L_m|}{NL_m} \right) 100 \quad (17)$$

where, L_i is the infiltrated depth at a given distance from the furrow inlet; L_m the mean infiltrated depth; N the number of the considered values.

Criteria for evaluating the goodness of fit of the kinematic wave model

The criteria utilized to evaluate the good of fit of the KW model are: mean square of error (CME) and error percentage (PE) among the observed and calculated parameters:

$$CME = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D - \hat{D})^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

where, D is the parameter calculated with field data, and \hat{D} is the parameter estimated from data simulated, and by:

$$PE = \frac{D - \hat{D}}{D} 100 \quad (19)$$

Postgraduados, Montecillo, Estado de México, localizado a 19° 29' N, 98° 54' O, altitud 2250 m; clima templado seco con lluvias en verano, con suelos de textura franco-arcillosa. Se tomaron datos de avance, almacenamiento, recesión, tirantes de agua e hidrogramas de gasto a la salida del surco, muestreos gravimétricos de humedad del suelo y mediciones de secciones transversales para caracterizar la geometría del surco (Cuadro 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El experimento cumple con las condiciones de pendiente y de régimen subcrítico para aplicar el enfoque cinemático, ésto es $S_0 = 0.0019 > 0.001$ y el producto $K \cdot F = 25.5 > 7.5$ (Cuadro 1). Los parámetros de infiltración estimados a partir de los datos de avance mediante la solución del problema inverso son: $K_s = 1.55 \text{ cm h}^{-1}$ y $\lambda = 4.31 \text{ cm}$. El valor de K_s es muy similar al valor promedio de $K_s = 1.74 \text{ cm h}^{-1}$ reportado por Rendón *et al.* (1990) y obtenido a partir de pruebas puntuales con anillos infiltrómetros en la misma parcela. El avance simulado con estos parámetros de infiltración se presenta en la Figura 2, donde se observa que las trayectorias del avance real y simulado son muy próximas, con un cuadrado medio de error (CME) de 0.74 min.

El volumen total aplicado fue 4.4 m^3 ; el volumen de escurrimiento distribuido sobre la superficie del surco fue 0.5 m^3 y el volumen infiltrado 3.7 m^3 . De lo anterior, el error de balance de masa fue 3.6%.

El perfil de la lámina infiltrada final (Figura 3), refleja todas las fases del riego. Además, se muestra el perfil típico que provoca el cierre al final del surco, un encharcamiento aguas abajo del surco. Para analizar y comparar la validez del modelo analizado se tomaron como base la eficiencia de aplicación (E_a) y el Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU_C).

Cuadro 1. Datos del experimento realizado en la parcela experimental E6, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Table 1. Data of the experiment carried out in the experimental plot E6, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Datos hidráulicos	Geometría del surco	Avance	
		x(m)	t(min)
$Q_0 = 1.1 \text{ lps}$	$\rho_1 = 0.2404$	10	2
$L = 110 \text{ m}$	$\rho_2 = 2.6868$	20	4
$S_0 = 0.0019 \text{ m/m}$	$\sigma_1 = 0.7269$	30	8
$n = 0.05$	$\sigma_2 = 0.5082$	40	12
$dt = 2 \text{ min}$		50	16
$\theta_s = 0.406 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$K \cdot F = 25.5$	60	20
$\theta_0 = 0.228 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$		70	25
$E_s = 0.75 \text{ m}$		80	31
$L_r = 5.3 \text{ cm}$		90	38
$L_r = \text{lámina requerida}$		100	47
		110	54

where, PE is the error percentage of mass balance; D the total applied volume; and \hat{D} the sum of the estimated infiltrated volume plus the runoff volume.

Collection of experimental data

In order to validate the proposed methodology, irrigation tests were carried out in plot E6 of the experimental field of the Colegio de Postgraduados, Montecillo, State of México, located at 19° 29' N, 98° 54' W, and at 2250 m altitude; temperate dry climate with summer rainfalls and loam-clay soils. Data of advance, storage, recession, water depth, and charge hydrographs at the end of the furrow, gravimetric samplings of soil moisture and measurements of cross-section areas to characterize furrow geometry (Table 1) were collected.

RESULTS AND DISCUSSION

The experiment fulfills the conditions of slope and subcritical regime to apply the kinematic approach, this is $S_0 = 0.0019 > 0.001$ and the value $K \cdot F = 25.5 > 7.5$ (Table 1). The infiltration parameters, estimated from the advance data by solving the inverse problem, are: $K_s = 1.55 \text{ cm h}^{-1}$ and $\lambda = 4.31 \text{ cm}$. The value of K_s is very similar to the mean value of $K_s = 1.74 \text{ cm h}^{-1}$ reported by Rendón *et al.* (1990) and obtained from the tests with infiltrometer rings in the same plot. The advance simulated with these parameters of infiltration is presented in Figure 2, where the trajectories of real and simulated advance are observed to be very close, with a mean square of error (CME) of 0.74 min.

The total applied volume was 4.4 m^3 ; the runoff volume distributed on furrow surface was 0.5 m^3 , and the infiltrated volume 3.7 m^3 . With respect to the aforementioned, the mass balance error was 3.6%.

The profile of the final infiltrated depth (Figure 3) reflects all irrigation phases. Furthermore, the typical profile, which provokes furrow end closing, a downstream furrow flooding, is shown. To analyze and compare the validity of the studied model, application efficiency (E_a) and Christiansen's uniformity coefficient (CU_C) were taken as base.

E_a observed was 89% and estimated E_a 96%, with a percentage error (PE) of 8%; CU_C observed was 86% against CU_C estimated of 94%, with a PE of 8%. These values are acceptable considering measurement errors and soil characteristics variability.

Depth evolution was observed at the end of the furrow ($L = 110 \text{ m}$). At this distance, depth readings were taken during irrigation in a test made on January 9th, 1997, and the combined effect of the KW model and the boundary condition of closed-end furrow, developed in this study, were simulated. The results are shown in Figure 4.

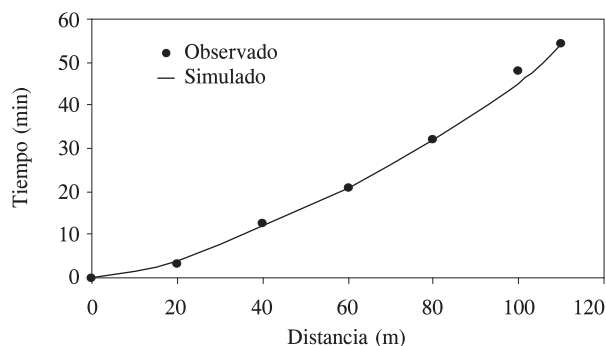


Figura 2. Fase de avance observada vs simulada.
Figure 2. Observed vs. simulated advance phase.

La E_a observada fue 89% y la E_a estimada 96%, con un porcentaje de error (PE) de 8%, el CU_C observado fue 86% contra el CU_C estimado de 94%, con un PE de 8%. Estos valores son aceptables si se consideran los errores de medición y la variabilidad de las características del suelo.

La evolución del tirante se observó al final del surco ($L=110$ m). A esta distancia se tomaron lecturas del tirante durante el riego en una prueba efectuada el 9 de enero de 1997, y se simuló el efecto combinado del modelo OC y la condición de frontera de surco cerrado desarrollada en este trabajo. Los resultados se muestran en la Figura 4.

Se observa que el tirante se incrementa rápidamente en los primeros 2 min, los valores observados y simulados están muy próximos; después se separan hasta alcanzar el tirante máximo. Luego los tirantes observados decrecen más lentamente que los simulados debido a que en la realidad el perímetro mojado disminuye y en el modelo se supone constante.

Además, los tirantes simulados se calcularon bajo la condición de frontera de surco abierto, por lo que su decrecimiento no considera el volumen que se infiltra como producto del cierre del surco. El área bajo las curvas de los tirantes observados y simulados es similar; ésto indica que se conserva el balance de masa, como en un surco abierto.

CONCLUSIONES

El modelo OC adaptado e integrado al modelo de infiltración de Green y Ampt simuló aceptablemente la condición de surco cerrado. El procedimiento simplificado que reemplaza la condición de frontera aguas abajo, permite redistribuir el volumen de escurrimiento sobre la superficie del surco, por efecto de la infiltración.

El manejo del riego por gravedad con surco cerrado permite aumentar el volumen infiltrado y, en consecuencia, aumentar la eficiencia de aplicación.

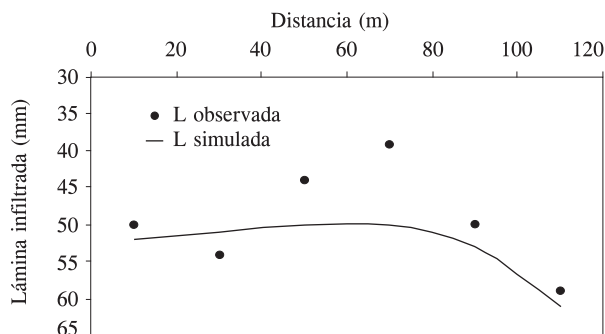


Figura 3. Lámina infiltrada observada vs lámina simulada.
Figure 3. Observed vs. simulated infiltrated depths.

It is observed that the depth increases fast in the first 2 min, the observed and simulated values are very close; afterwards they separate until reaching the maximum depth. Then, the observed depths decrease more slowly than the simulated ones due to the fact that in reality the wetted perimeter diminishes and is assumed constant in the model.

Furthermore, the simulated depths were calculated under open furrow boundary condition; that is why its decrease does not consider the volume that infiltrates as a result of furrow closing. The area under the observed and simulated depth curves is similar; this indicates that mass balance is conserved as in opened-end furrow.

CONCLUSIONS

The KW model, adapted and integrated to the Green and Ampt infiltration model simulated acceptably the closed-end furrow condition. The simplified procedure, which replaces the downstream boundary condition, allows redistributing the runoff volume on the furrow surface by infiltration effect.

The management of surface irrigation with closed-end furrows allows to increase the infiltrated volume and consequently, this improves application efficiency.

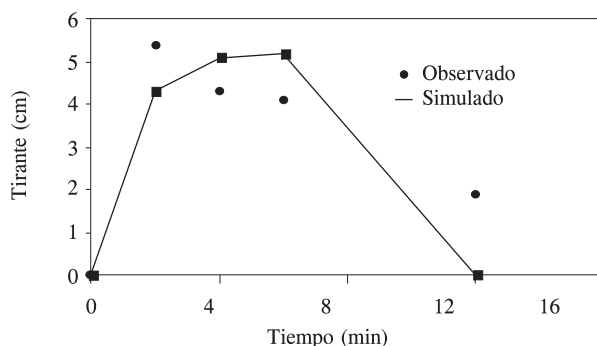


Figura 4. Evolución del tirante al final del surco.
Figure 4. Depth evolution at furrow end.

Sin embargo, el volumen percolado puede incrementarse si el gasto y tiempo de riego son excesivos e inducir problemas de encharcamiento. El modelo OC desarrollado permite simular diferentes condiciones de gastos y tiempos de riego, para elegir la estrategia que mejore la eficiencia de aplicación y uniformidad sin provocar excesos de agua al final del surco.

AGRADECIMIENTOS

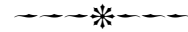
A la Unidad de Investigación en Irrigación del Instituto Francés de Investigación Agrícola y Ambiental, Cemagref, Montpellier, Francia, por la facilidades brindadas para concluir esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Abu-Awwad, A. M. 1998. Irrigation management in arid areas affected by surface crust. *Agric. Water Manag.* 38(1): 21-32.
- Fuentes, C. 1990. Teoría de la infiltración unidimensional: 2. La infiltración vertical. *Agrociencia* 2: 120-145.
- Gharbi, A., H. Daghari, and K. Cherif. 1993. Effect of flow fluctuations on free draining, sloping furrow and border irrigation systems. *Agric. Water Manag.* 24: 299-319.
- González, J. M., B. Muñoz, y R. Acosta. 1996. Solución numérica del problema inverso avance-infiltración (Green y Ampt) en riego por gravedad. *In: Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador.* 5: 341-351.
- Green, W. A., and G. A. Ampt. 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24.
- ICID (International Commission on Irrigation and Drainage). 1978. Describing irrigation efficiency and uniformity. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE.* 104(IR1): 35-41.
- Khatri, K. L., and R. J. Smith. 2005. Evaluation of methods for determining infiltration parameters from irrigation advance data. *Irrig. Drain.* 54: 467-482.
- Mailhol, J. C., and J. M. González. 1993. Furrow irrigation model for real time applications on cracking soils. *J. Irrig. Drain. Eng.* 119(5): 768-783.

The percolated volume, however, may be increased if inflow-rate and irrigation time are excessive and induce flooding problems. The developed KW model allows simulating different conditions of inflow rates and irrigation times, to choose the strategy that improve application efficiency and uniformity, without creating water excess at the end of the furrow.

—End of the English version—



- Mailhol, J. C., M. Baqri, and M. Lachhab. 1997. Operative irrigation modelling for real-time applications on closed-end furrows. *Irrig. Drain. Syst.* 11(4): 347-366.
- Parlange, J. Y., I. Lisle, and R. D. Braddock. 1982. The three parameter infiltration equation. *Soil Sci.* 133(6): 337-341.
- Philip, J. R. 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosci.* 5: 215-296.
- Philip, J. R., and D. A. Farrell. 1964. General solution of the infiltration-advance problem in irrigation hydraulics. *J. Geophys. Res.* 69(4): 621-631.
- Reddy, J. M., and V. P. Singh. 1994. Modeling and error analysis of kinematic wave equation of furrow irrigation. *Irrig. Sci.* 15: 113-122.
- Rendón, L., J. Ortíz, y R. Acosta. 1990. Riego eficiente del trigo en melgas. *In: Memorias análisis de la problemática del agua y perspectivas para la modernización de su uso en la agricultura de Guanajuato.* Celaya, Guanajuato. pp: 157-170.
- Scaloppi, E. J. 1986. Mathematical models to improve surface irrigation performance. *In: International Commission on Irrigation and Drainage. 33th Congress.* Rabat, Morocco. Q40, R.36. pp: 577-588.
- Souza, F. 1984. Modelo matemático da irrigação por sulcos. *Pesq. Agropec. Bras., Brasília* 19(9): 1135-1143.
- Walker, W. R., and A. S. Humpherys. 1983. Kinematic wave furrow irrigation model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 109(4): 377-392.
- Walker, W. R., and G. V. Skogerboe. 1987. *Surface Irrigation: Theory and Practice.* NJ USA. Prentice Hall Inc. 386 p.
- Wallender, W. W., and J. Yokokura. 1991. Space solution of kinematic wave model by time iteration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 117(1): 140-144.